9 月 September
2020, 63(9): 1108 - 1116
昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA
http: //www. insect. org. cn
doi: 10. 16380/j. kcxb. 2020. 09. 008

变温对甘蓝夜蛾生长发育和繁殖的影响

赵晨宇[1], 李新畅[1], 崔 娟[1,2,*], 高 宇[1], 史树森[1,*]

(1. 吉林农业大学植物保护学院, 长春 130118; 2. 吉林农业科技学院农学院, 吉林 132101)

摘要:【目的】明确自然变温环境对甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* 生长发育和繁殖的影响,深入研究其对环境温度的适应性。【方法】在 13～25℃(日平均 19℃), 16～28℃(日平均 22℃), 19～31℃(日平均 25℃), 22～34℃(日平均 28℃)和 25～37℃(日平均 31℃)5 个梯度变温条件下,以大豆 *Glycine max* 植株叶片为寄主材料饲养甘蓝夜蛾卵,测定其各虫态发育历期、发育速率、成虫繁殖力及发育起点温度和有效积温。【结果】变温范围为 13～25℃时甘蓝夜蛾发育历期最长,世代发育历期为 65.93 d,显著长于其他变温处理。且随温度升高,其发育历期缩短,变温范围为 22～34℃时,该虫发育历期最短,世代发育历期为 38.46 d,显著短于其他变温处理。在变温范围为 25～37℃时,该虫不能正常完成个体发育。在日平均温度(T)19～28℃范围内(最大温差 12℃),甘蓝夜蛾卵、幼虫及蛹期的发育速率随温度升高而加快,且各个虫态发育速率(V)拟合方程均符合线性方程模型:$V_{卵期}=0.125+0.048T$, $V_{幼虫期}=0.023+0.012T$, $V_{蛹期}=0.027+0.013T$, $V_{成虫}=0.073+0.47T$。甘蓝夜蛾雌雄成虫的寿命随着日平均温度的升高而逐渐缩短,雌雄成虫寿命在日变温范围 13～25℃时最长,分别为 7.91 d 和 8.00 d;在变温范围 22～34℃时最短,分别为 3.00 d 和 3.57 d。甘蓝夜蛾卵、幼虫、蛹、成虫发育起点温度分别为 7.98, 6.54, 9.36 和 10.78℃,有效积温依次为 87.00, 607.36, 351.51 和 108.52 d·℃。16～28℃的变温范围更适合甘蓝夜蛾种群的生存与繁殖,其种群趋势指数 I 为 117.81。【结论】甘蓝夜蛾属于偏低温适应性害虫,对高温环境适应能力较低。研究结果为进一步研究甘蓝夜蛾自然种群发生规律及其发生期、发生量预测预报提供了科学依据。

关键词: 甘蓝夜蛾; 变温; 发育历期; 发育起点温度; 有效积温; 种群趋势指数

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2020)09-1108-09

Effects of fluctuating temperature on the growth, development and reproduction of *Mamestra brassicae* (Lepidoptera: Noctuidae)

ZHAO Chen-Yu[1], LI Xin-Chang[1], CUI Juan[1,2,*], GAO Yu[1], SHI Shu-Sen[1,*] (1. College of Plant Protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. College of Agriculture, Jilin Agricultural Science and Technology College, Jilin 132101, China)

Abstract:【Aim】This study aims to clarify the effects of fluctuating temperature on the growth, development and reproduction of the cabbage moth, *Mamestra brassicae*, and to explore its adaptability to environmental temperature.【Methods】*M. brassicae* eggs were bred with soybean (*Glycine max*) leaves and observed under five gradient fluctuating temperature ranges 13 - 25℃ (daily average 19℃), 16 - 28℃ (daily average 22℃), 19 - 31℃ (daily average 25℃), 22 - 34℃ (daily average 28℃), and 25 - 37℃ (daily average 31℃) in the laboratory, and the developmental duration, developmental rate, fecundity, developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *M. brassicae* at various developmental stages were measured.【Results】The developmental duration of *M. brassicae* at

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0201004); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04)
作者简介: 赵晨宇, 女, 1994 年 7 月生, 吉林长春人, 硕士研究生, 研究方向为害虫综合治理, E-mail: 873655804@qq.com
* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: cuijuanjilin@163.com; sss-63@263.net
收稿日期 Received: 2020-02-07; 接受日期 Accepted: 2020-03-24

the fluctuating temperature range 13－25℃ was the longest, and the generation time was 65.93 d, which was significantly longer than that at the other fluctuating temperature ranges. The duration of different developmental stages decreased as the temperature increased. The developmental duration at the fluctuating temperature range 22－34℃ was the shortest, and the generation time was 38.46 d, which was significantly shorter than that at other fluctuating temperature ranges. Under the fluctuating temperatures ranging from 25℃ to 37℃, the larvae could not normally complete the individual development. In the range of daily average temperature (*T*) of 19－28℃ (maximum temperature difference 12℃), the developmental rate of egg, larval and pupal stages were accelerated with increasing temperature, and the fitting equations of the developmental rate (*V*) of each developmental stage conformed to the linear model: $V_{egg} = 0.125 + 0.048T$, $V_{larva} = 0.023 + 0.012T$, $V_{pupa} = 0.027 + 0.013T$, $V_{adult} = 0.073 + 0.47T$. The longevity of female and male adults decreased with temperature. The longevity of female and male adults at the fluctuating temperature range 13－25℃ was the longest, being 7.91 d and 8.00 d, respective, and that at the fluctuating temperature range 22－34℃ was the shortest, being 3.00 d and 3.57 d, respectively. The developmental threshold temperatures of egg, larva, pupa, and adult were 7.98, 6.54, 9.36, and 10.78℃, respectively, and the corresponding effective accumulated temperatures were 87.00, 607.36, 351.51, and 108.52 d·℃, respectively. The fluctuating temperature range 16－28℃ was more optimal for the development, survival and reproduction of *M. brassicae*, at which its population trend index *I* was 117.81. 【Conclusion】*M. brassicae* is a low temperature adaptive pest and has a low ability to adapt to high temperature. The results provide a scientific basis for further studying the natural population occurrence law of *M. brassicae* and forecasting its occurrence period and degree.

Key words: *Mamestra brassicae*; fluctuating temperature; developmental duration; developmental threshold temperature; effective accumulated temperature; population trend index

甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* 隶属于鳞翅目(Lepidoptera)夜蛾科(Noctuidae),是一种为害农作物的多食性害虫。该虫主要为害十字花科(Brassicaceae)、藜科(Chenopodiaceae)、豆科(Leguminosae)等作物,以幼虫取食寄主叶片,轻者食成孔洞和缺刻,重者可将叶片蚕食殆尽,严重影响作物产量和品质。

温度是影响害虫发生危害的重要环境因子,相关研究已有很多报道,所涉及的害虫如巨膜长蝽(何嘉等, 2014)、二点委夜蛾 *Athetis lepigone*(党志红等, 2011; 曹美琳, 2013)、褐边绿刺蛾 *Parasa consocia*(鞠瑞亭等, 2007)、草小卷蛾 *Celypha flavipalpanus*(王淼等, 2015)等。罗进仓等(1993)研究报道了甘蓝夜蛾在室温条件下,以甜菜 *Beta vulgaris* 为寄主的发育起点温度和有效积温;史树森等(2014)以大豆 *Glycine max* 为寄主,明确了甘蓝夜蛾各龄期幼虫取食量,并观察了 26～27℃室温条件下甘蓝夜蛾各虫态发育历期;于洪春等(2013)研究了温度和光周期对甘蓝夜蛾哈尔滨种群滞育诱导的影响。昆虫是典型的变温动物,体内的各种生命活动极易受环境温度变化的影响,研究温度变化对昆虫生长、发育的影响具有重要理论和实践意义(时培建等, 2011)。潘飞等(2012)研究认为,与恒温相比,自然变温条件下昆虫的发育起点温度更低,能够发育的温度范围更广。截至目前,关于变温对昆虫生长发育影响的研究已有一些报道,如王娟等(2016)对粘虫 *Mythimna separata* 生殖和能源物质代谢,吴晓晶等(1994)对松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 和瓜螟 *Diaphania indica* 发育速率,吴坤君等(2009)对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 蛹的发育等研究,但其对变温处理多采用两段恒温交替方式。而模拟昼夜自然变温环境对农业害虫生长发育影响的研究尚不多见。

为了深入探讨甘蓝夜蛾在自然变温环境下的生长发育和繁殖等生物学特性,进一步掌握其在农作物田间发生为害规律,我们以大豆叶片为寄主材料饲养甘蓝夜蛾幼虫,模拟自然昼夜变温环境测定其在不同日平均温度条件下各虫态发育历期、发育速率、发育起点温度和有效积温及其成虫繁殖力等,以期为生产实际中更准确预测预报及科学防治该害虫

提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 虫源：虫源采自吉林农业大学教学科研基地(43°82′N, 125°40′E)，将采集的虫源置于温度25℃±1℃，相对湿度65%±5%，光周期16L∶8D，以盆栽大豆苗为寄主的人工气候室中饲养建立实验种群。将附着有成虫初产卵的叶片剪下，用湿润脱脂棉包裹叶柄保湿，放在底部平铺湿润脱脂棉和滤纸的培养皿中备用，作为供试虫源材料。

1.1.2 寄主：寄主材料为大豆盆栽植株花荚期的新鲜叶片，品种为“吉农18”。

1.1.3 养虫器具：养虫笼为铝合金框架纱网结构(50 cm×50 cm×50 cm)，网孔为40目；塑料养虫罐(直径10 cm，高14 cm)；塑料养虫管(50 mL)；塑料培养皿(直径6 cm)；玻璃培养皿(直径10 cm)；小毛笔、镊子、海绵块、脱脂棉和滤纸等。

1.1.4 实验设备：PQX-450H人工气候箱[中仪国科(北京)科技有限公司]，控制温度为温度分辨率0.1℃，恒温波动度±0.5℃，温度均匀度±2℃，控湿范围RH±5%～7%，光照强度0～20 000 lx；OLYMPUS-SZ61体视显微镜(日本OLYMPUS公司)。

1.2 变温处理

采用人工气候箱(PQX-450H)自动调控变温，模拟自然昼夜温度变化(最大温差12℃)，设5个日平均梯度变温条件处理：

(1) 13-15-17-19-21-23-25-23-21-19-17-15-13℃，日平均19℃；

(2) 16-18-20-22-24-26-28-26-24-22-20-18-16℃，日平均22℃；

(3) 19-21-23-25-27-29-31-29-27-25-23-21-19℃，日平均25℃；

(4) 22-24-26-28-30-32-34-32-30-28-26-24-22℃，日平均28℃；

(5) 25-27-29-31-33-35-37-35-33-31-29-27-25℃，日平均31℃。

各处理梯度变温时段12个，每个时段为2 h，相对湿度65%±5%，光周期16L∶8D。

1.3 变温处理下甘蓝夜蛾各虫态生长发育指标观测

1.3.1 卵发育历期：将上述虫源卵分别置于5个梯度变温的人工气候箱内，每个处理20粒卵，5次重复。每日8∶00和20∶00时定时观察并记录卵的孵化情况，计算卵历期。

1.3.2 幼虫和蛹发育历期：卵孵化后，用毛笔取初孵幼虫单头饲养于塑料培养皿(直径6 cm)内，每个温度10头，5个重复。每天定时更换新鲜大豆叶片，用湿润脱脂棉包裹其叶柄保湿，同时清理虫粪，更换干净湿润滤纸。每日8∶00和20∶00时定时观察并记录幼虫蜕皮及死亡情况直至化蛹。幼虫化蛹后，观察蛹的雌雄(董前进等, 2019; 冯丽凯等, 2019)并记录数量及死亡情况。

1.3.3 温度对成虫产卵和寿命的影响：每个温度下的蛹羽化成虫后，进行雌雄配对并置于养虫罐(直径10 cm，高14 cm)中单对饲养，罐内置入新鲜保湿的离体叶片，饲喂成虫5%蜂蜜水以补充营养。每日8∶00和20∶00时定时观察记录养虫罐内产在叶片及养虫罐内壁上的卵粒数，直至成虫死亡。5次重复。

1.4 甘蓝夜蛾发育速率与温度关系分析

将不同变温处理下甘蓝夜蛾卵、各龄幼虫、蛹和成虫的发育历期进行平均，将其转为对应温度下的发育速率V ($V=1/N$)，再运用SPSS软件建立发育速率(V)与温度(T)的回归模型，根据R^2和F值检查线性回归的显著性，选择拟合程度最好的方程(邓维斌等, 2012)。

1.5 甘蓝夜蛾发育起点温度和有效积温的测定

根据李典谟和王莽莽(1986)提出的直接最优法计算各虫态的发育起点温度C和有效积温K，公式如下：

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{n}T_iD_i^2-\overline{D}\sum_{i=1}^{n}T_iD_i}{\sum_{i=1}^{n}D_i^2-n\overline{D}^2};\quad K=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{1}K_i。$$

式中：T_i为实验设定的温度(℃)；D_i为在T_i温度条件下的发育历期(d)；K_i为发育起点温度是C时的有效积温(d·℃)。

1.6 甘蓝夜蛾实验种群生命表分析

结合上述系统观察结果，组建甘蓝夜蛾实验种群特定年龄生命表(Morris, 1963)，种群趋势指数I值根据Morris(1963)和Watt(1963)提出的种群数量模型计算，公式如下：

$$I=N_{(n+1)}/N_n=SE\times SL1\times SL2\times\cdots\times SP\times SA\times P_{♀}\times F。$$

式中：I表示种群趋势指数；SE, $SL1$, …, SA分别表示卵、各龄幼虫、预蛹、蛹、成虫的存活率；$P_{♀}$指雌虫

比率；F 指平均单雌产卵量。

1.7　数据分析

通过 Microsoft Excel 2016（微软公司，美国华盛顿州的雷德蒙德）和 SPSS 20（IBM，美国纽约州阿蒙克市）对实验数据进行分析。甘蓝夜蛾在不同变温下的发育历期、产卵和寿命等数据进行单因素方差分析（ANOVA），并利用 Tukey 氏法检验其差异显著性。描述性统计数据均用平均值 ± 标准误表示。

2　结果

2.1　不同变温处理对甘蓝夜蛾实验种群生长发育的影响

2.1.1　各虫态发育历期：不同变温处理下甘蓝夜蛾各虫态发育历期如表 1 所示。在日平均温度 19 ~ 28℃的各梯度变温处理间，甘蓝夜蛾各虫态及世代的发育历期均存在显著差异，且呈随日均温度升高而缩短的趋势。卵在日变温范围为 25 ~ 37℃（日平均 31℃）时历期最短，仅为 2.25 d，与日变温范围为 22 ~ 34℃（日平均 28℃）时历期无显著差异（$P > 0.05$），但显著短于其他日变温范围下卵的历期（$P < 0.05$），比日平均 19℃时缩短了 3.12 d；幼虫在日变温范围为 13 ~ 25℃（日平均 19℃）时发育历期最长，为 37.00 d，在日变温范围为 22 ~ 34℃（日平均 28℃）时幼虫发育历期最短，仅为 23.31 d，两者相差近 15 d，而日变温范围为 25 ~ 37℃（日平均 31℃）时不能完成其幼虫发育；蛹期在日变温范围为 13 ~ 25℃（日平均 19℃）时最长，为 23.57 d，日变温范围为 22 ~ 34℃（日平均 28℃）时仅为 12.15 d，少部分蛹发育历期在日变温范围为 22 ~ 34℃（日平均 28℃）条件下发生为期 40 d 左右的滞育（越夏），之后正常羽化；成虫历期在日变温范围为 13 ~ 25℃（日平均 19℃）时最长，为 7.93 d，而日变温范围为 22 ~ 34℃（日平均 28℃）条件下最短，仅为 3.69 d，比前者缩短 4.24 d。从整个世代看，日变温范围为 13 ~ 25℃（日平均 19℃）时该虫世代发育历期最长，为 65.93 d；日变温范围为 22 ~ 34℃（日平均 28℃）时，该虫世代发育历期最短，仅为 38.46 d。

表 1　不同变温下甘蓝夜蛾各虫态的发育历期

Table 1　Developmental duration of *Mamestra brassicae* at different fluctuating temperatures

日变温范围（℃） Daily temperature range	日平均温度（℃） Daily average temperature	发育历期 Developmental duration (d)				
		卵 Egg	幼虫 Larva	蛹 Pupa	成虫 Adult	世代 Generation
13 – 25	19	5.37 ± 0.09 a	37.00 ± 0.39 a	23.57 ± 0.16 a	7.93 ± 0.21 a	65.93 ± 0.39 a
16 – 28	22	4.76 ± 0.08 b	29.30 ± 0.35 b	19.70 ± 0.22 b	6.13 ± 0.15 b	53.77 ± 0.37 b
19 – 31	25	4.00 ± 0.02 c	25.30 ± 0.24 c	16.05 ± 0.26 c	5.22 ± 0.21 c	45.35 ± 0.37 c
22 – 34	28	3.00 ± 0.13 d	23.31 ± 0.30 d	12.15 ± 0.10 d	3.69 ± 0.17 d	38.46 ± 0.29 d
25 – 37	31	2.25 ± 0.10 d	–	–	–	–

表中数字为平均值 ± 标准误；同一列数据后不同小写字母表示 Tukey 氏多重比较差异显著（$P < 0.05$）。Data in the table are mean ± *SE*, and different small letters following the data in the same column mean significant difference ($P < 0.05$) by Tukey's multiple range test. 表 2 和 4 同 The same for Tables 2 and 4.

2.1.2　各龄幼虫发育历期：不同变温下各龄幼虫的发育历期如表 2 所示。甘蓝夜蛾各龄幼虫发育历期呈随日平均温度升高而缩短的趋势，在日变温幅度为 13 ~ 25℃（日平均 19℃）下发育最慢，历期最长；1 龄幼虫在日变温范围为 25 ~ 37℃（日平均 31℃）下发育最快，历期最短，2 – 4 龄幼虫在日平均温度 28℃和 31℃条件下发育历期无显著差异（$P > 0.05$），3 – 4 龄幼虫在日平均温度 25℃，28℃和 31℃条件下发育历期无显著差异（$P > 0.05$）。日变温范围为 25 ~ 37℃（日平均 31℃）下幼虫发育至 5 龄时无存活，可见，日平均温度 31℃不适宜甘蓝夜蛾幼虫的生长发育，至少在 37℃的高温时段不适宜其幼虫的存活。

2.2　甘蓝夜蛾发育速率与日平均温度的关系

线性模型适用于描述适温区温度对昆虫发育速率和增长速率的影响（凡美玲等，2017），根据甘蓝夜蛾在不同变温处理条件下发育历期，计算其在不同温度条件下的发育速率，利用线性回归模型对甘蓝夜蛾各虫态及幼虫各龄期在日平均温度为 19℃，22℃，25℃和 28℃条件下的发育速率与日平均温度的关系进行拟合，结果如表 3 所示。在日平均温度 19 ~ 28℃范围内，甘蓝夜蛾各虫态及幼虫各龄期发育速率均与温度呈显著正相关，即各虫态及幼虫各龄期发育速率随温度升高而加快，且各虫态及幼虫各龄期发育速率与日平均温度拟合方程均符合线性方程模型。

表 2 不同变温下甘蓝夜蛾各龄幼虫的发育历期(d)

Table 2 Developmental duration (d) of different instar larvae of *Mamestra brassicae* at different fluctuating temperatures

幼虫龄期	日平均温度 Daily average temperature (日变温范围 Daily temperature range)				
Larval instars	19℃(13 -25℃)	22℃(16 -28℃)	25℃(19 -31℃)	28℃(22 -34℃)	31℃(25 -37℃)
1 龄 1st instar	5.33 ±0.10 a	4.20 ±0.12 b	2.95 ±0.09 c	2.84 ±0.10 cd	2.25 ±0.25 d
2 龄 2nd instar	5.97 ±0.13 a	3.43 ±0.10 b	2.55 ±0.11 c	2.38 ±0.07 c	2.25 ±0.29 c
3 龄 3rd instar	4.43 ±0.18 a	3.16 ±0.11 b	2.70 ±0.10 bc	2.54 ±0.14 c	2.25 ±0.02 c
4 龄 4th instar	4.30 ±0.18 a	3.63 ±0.09 ab	2.95 ±0.11 bc	2.76 ±0.12 bc	2.50 ±0.50 c
5 龄 5th instar	4.03 ±0.16 a	3.27 ±0.10 b	3.05 ±0.11 b	2.77 ±0.17 b	
6 龄 6th instar	12.93 ±0.14 a	11.60 ±0.18 b	11.10 ±0.10 b	10.00 ±0.11 c	

表 3 甘蓝夜蛾各虫态发育速率(*V*)与日平均温度(*T*)的回归方程

Table 3 Regression function of developmental rate (*V*) and daily average temperature (*T*) for *Mamestra brassicae* at different developmental stages

发育阶段	回归方程	显著性检验 Significance test		
Developmental stage	Regression equation	R^2	F	P
卵 Egg	$V = 0.125 + 0.048T$	0.926	24.869	0.038
幼虫期 Larva	$V = 0.023 + 0.012T$	0.998	80.989	0.012
1 龄幼虫 1st instar larva	$V = 0.131 + 0.059T$	0.930	26.415	0.036
2 龄幼虫 2nd instar larva	$V = 0.081 + 0.096T$	0.991	209.123	0.005
3 龄幼虫 3rd instar larva	$V = 0.146 + 0.082T$	0.999	133.453	0.008
4 龄幼虫 4th instar larva	$V = 0.191 + 0.046T$	0.976	81.257	0.012
5 龄幼虫 5th instar larva	$V = 0.220 + 0.036T$	0.981	48.255	0.020
6 龄幼虫 6th instar larva	$V = 0.070 + 0.007T$	0.976	81.526	0.012
蛹期 Pupa	$V = 0.027 + 0.013T$	0.958	45.559	0.021
成虫 Adult	$V = 0.073 + 0.470T$	0.931	26.880	0.035

2.3 不同变温条件对甘蓝夜蛾雌雄成虫寿命的影响

不同变温处理下甘蓝夜蛾产卵前期及雌雄成虫寿命如表 4 所示。甘蓝夜蛾雌雄成虫寿命随着日平均温度升高而逐渐缩短,且各温度间存在显著差异($P < 0.05$)。雌成虫平均寿命最长为 8.00 d,最短为 3.57 d;雄成虫平均寿命最长为 7.91 d,最短仅为 3.00 d。产卵前期在日变温范围 13 ~25℃(日平均 19℃)时显著延长,为 3.44 d,而日平均温度 22 ~28℃范围内,产卵前期无显著差异($P > 0.05$)。日变温范围为 25 ~37℃(日平均 31℃)时,甘蓝夜蛾不能发育到成虫期。

表 4 不同变温下甘蓝夜蛾成虫产卵前期和平均寿命

Table 4 Pre-oviposition duration and average longevity of *Mamestra brassicae* adults at different fluctuating temperatures

日变温范围(℃)	日平均温度(℃)	产卵前期(d)	平均寿命 Average longevity (d)	
Daily temperature range	Daily average temperature	Pre-oviposition duration	♀	♂
13 -25	19	3.44 ±0.13 a	8.00 ±0.26 a	7.91 ±0.29 a
16 -28	22	2.77 ±0.17 ab	6.33 ±0.16 b	6.27 ±0.27 b
19 -31	25	2.50 ±0.22 b	5.25 ±0.25 c	4.33 ±0.33 c
22 -34	28	2.00 ±0.00 b	3.57 ±0.20 d	3.00 ±0.57 d
25 -37	31	-	-	-

2.4 各虫态的发育起点温度和有效积温

不同变温处理下甘蓝夜蛾各虫态发育起点温度及有效积温如表 5 所示。不同发育阶段其发育起点温度和有效积温各不相同,幼虫期的发育起点温度最低为日平均 6.54℃,卵期、蛹期、产卵前期和成虫期的发育起点温度分别为日平均 7.98, 9.36, 10.22

和 10.78℃；各虫态有效积温为：卵期 87.00 d·℃，幼虫期 607.36 d·℃，蛹期 351.51 d·℃，成虫期 108.52 d·℃，成虫产卵前期 59.44 d·℃。整个世代的发育起点温度和有效积温分别为日平均 6.76℃和 1 213.06 d·℃。

表 5　甘蓝夜蛾各虫态的发育起点温度和有效积温

Table 5　Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature (EAT) for various developmental stages of *Mamestra brassicae*

发育阶段 Developmental stage	发育起点温度(℃) Developmental threshold temperature	有效积温(d·℃) Effective accumulated temperature
卵 Egg	7.98 ± 1.09	87.00 ± 12.34
幼虫 Larva	6.54 ± 1.34	607.36 ± 18.20
蛹 Pupa	9.36 ± 1.36	351.51 ± 14.52
成虫 Adult	10.78 ± 2,24	108.52 ± 11.66
产卵前期 Pre-oviposition period	10.22 ± 2.09	59.44 ± 12.65
世代 Generation	6.76 ± 1.15	1 213.06 ± 18.98

表中发育起点温度为日平均值。The developmental threshold temperature in the table is the daily average.

2.5　不同变温条件下实验种群生命表分析

根据不同变温度下甘蓝夜蛾各发育阶段存活情况及成虫繁殖力数据，建立甘蓝夜蛾种群特定年龄生命表如表 6 所示。在日平均温度 19～31℃范围内，不同变温条件下成蛾率随温度升高呈先升后降的趋势，其中日变温范围 16～28℃(日平均 22℃)下成蛾率最高，日变温范围 22～34℃(日平均 28℃)下成蛾率最低；单雌产卵量亦随日平均温度升高呈先升后降的趋势，其中日平均 22℃下成虫单雌产卵量最高，为 327.22 粒。在日平均温度 19～28℃范围内，各温度下种群趋势指数 I 均大于 1，表明甘蓝夜蛾下一代种群数量呈增长趋势，种群可以延续，其中，日变温范围 16～28℃(日平均 22℃)时种群趋势指数最高，I = 117.81，是其他各温度下种群趋势指数的 2.21～9.01 倍。而日变温范围 25～37℃(日平均 31℃)下甘蓝夜蛾未完成整个世代发育。

表 6　不同变温下甘蓝夜蛾实验种群特定年龄生命表

Table 6　Age-specific life table of *Mamestra brassicae* at different fluctuating temperatures

生命表参数 Life table parameters		日平均温度 Daily average temperature (日变温范围 Daily temperature range) 19℃ (13－25℃)	22℃ (16－28℃)	25℃ (19－31℃)	28℃ (22－34℃)	31℃ (25－37℃)
各发育阶段存活率 Survival rate at various developmental stages (%)	卵 Egg	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	1 龄幼虫 1st instar larva	90.00	90.00	90.00	84.00	44.00
	2 龄幼虫 2nd instar larva	88.89	86.67	84.44	88.10	45.45
	3 龄幼虫 3rd instar larva	97.50	94.87	78.95	81.08	40.00
	4 龄幼虫 4th instar larva	97.44	97.30	90.00	86.67	50.00
	5 龄幼虫 5th instar larva	94.74	97.22	96.30	76.92	0.00
	6 龄幼虫 6th instar larva	94.44	91.43	76.92	65.00	–
	蛹 Pupa	91.18	93.75	90.00	92.31	–
	成虫 Adult	87.10	96.67	94.44	83.33	–
雌成虫比例 Proportion of female adults (%)		51.85	62.07	58.82	60.00	–
繁殖力(单雌产卵量) Fecundity (number of eggs laid per female)		99.08	327.22	266.17	109.00	–
预计下代卵量 Expected number of eggs of the next generation		2 774.33	11 781.41	5 322.91	1 307.97	–
种群趋势指数 Index of population growth I		27.74	117.81	53.23	13.08	–

3　讨论

在气象环境因素中，温度对昆虫生长发育的影响最为显著，即环境温度决定其发育速率的快慢。关于环境温度与昆虫生长发育速率关系的研究，时培建等(2011)对相关模型的发展与应用进行了评述，并讨论了研究温度与害虫发育速率关系对在全

球气候变暖的背景下，深入了解评估害虫危害性的重要意义。关于恒温与变温环境对害虫生长发育的影响，刘树生和孟学多(1989)通过研究桃蚜 *Myzus persicae* 和萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 在恒温和变温下发育速率的变化规律，明确了在适温区，温度波动不改变发育速率与温度的函数关系，但在恒温下的高温区(桃蚜：>28℃；萝卜蚜：>30℃)随温度升高死亡率急剧增加、发育速率迅速下降，而在变温下高温区内的发育速率随高温停留时间延长而逐渐下降；在恒温下的低温区只能完成部分虫期发育，而变温下的发育速率亦接近经典的 Logistic 曲线。吴晓晶等(1994)通过松毛虫赤眼蜂和瓜螟在多组恒温和(两段恒温)交替变温下的发育历期研究也表明，在一定温度范围内(松毛虫赤眼蜂：20 ~ 34℃；瓜螟：26 ~ 36℃)恒温和变温下其完成发育所需的热量无显著差异，且无论在恒温还是变温条件下在高温区均表现出发育速率随温度升高而下降。吴坤君等(2009)通过研究恒温(15 ~ 37℃)和变温(12/18℃ ~ 34/40℃两时段恒温交替)对棉铃虫蛹发育的影响，得出了在低温区，蛹在变温下的发育比在恒温下快，在高温区则相反，只有在中间的适温区，蛹的发育率在变温和恒温下才比较接近的一般性结论。本实验采用人工气候箱梯度(12 个时段)自动调控变温，模拟自然昼夜温度变化(最大温差 12℃)，研究了 13 ~ 25℃(日平均 19℃)，16 ~ 28℃(日平均 22℃)，19 ~ 31℃(日平均 25℃)，22 ~ 34℃(日平均 28℃)和 25 ~ 37℃(日平均 31℃) 5 个梯度变温条件对甘蓝夜蛾各虫态发育历期的影响，结果显示，在实验温度范围内，甘蓝夜蛾各虫态及世代发育历期随日平均温度升高而呈缩短趋势，即发育速率随温度升高而加快，但在日平均温度 31℃(变温范围 25 ~ 37℃)的变温条件下，甘蓝夜蛾幼虫发育至 5 龄后全部死亡(表 1 和 2)，表明甘蓝夜蛾高龄幼虫对高温更加敏感，至少 37℃已达到其致死高温，而卵和 1 - 4 龄幼虫的发育速率在日平均温度 31℃(含 37℃高温时段)条件下并未出现降低现象，这一结果与上述瓜螟蛹(吴晓晶等，1994)、棉铃虫蛹(吴坤君等，2009)在高温区发育速率随温度升高而降低的结果似乎并不一致。其原因可以依据上述刘树生和孟学多(1989)对桃蚜和萝卜蚜的研究结果加以解释。即“在变温下高温区内的发育速率随高温停留时间延长而逐渐下降”，上述针对瓜螟和棉铃虫蛹的研究均采用“两时段交替”变温处理(高低温时段为 12 h∶12 h 或 8 h∶16 h)，而本研究的变温处理在高温(37℃)时段仅为 2 h，其结果可能是由于昆虫在不适高温环境下持续时间较短所致。关于在热量积累相同的情况下变温环境是否更有利于昆虫的生存，仍需做进一步深入研究与探讨。而在农田自然条件下，日间高温时段通常出现在中午偏后的 2 ~ 4 h，因此，适当增加变温时段数模拟自然变温环境可以更真实地反映出害虫对温度环境的适应情况。

本实验结果表明，甘蓝夜蛾对环境高温更加敏感，高温环境对其幼虫的生长发育不利，同时甘蓝夜蛾成虫寿命也随环境温度升高而显著缩短(表 4)。这种随着温度升高，成虫寿命减短的现象在点蜂缘蝽 *Riptortus pedestris*（陈菊红等，2018)、豆卷叶螟 *Lamprosema indicata*(李新畅等，2018)、斑鞘豆叶甲 *Colposcelis signata*(史树森等，2013)、栎黄枯叶蛾 *Trabala vishnou*(刘永华等，2016)、桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis*(罗智心等，2009)、紫斑谷螟 *Pyralis farinalis*(尚小丽等，2013)、尖锥额野螟 *Sitochroa verticalis*(史树森等，2015)等都有相关报道。

昆虫属于变温动物，其生长发育和繁殖与生存环境的温度条件息息相关(于洪春等，2013)，明确某种害虫的发育起点温度和有效积温，对科学认识该害虫的发生规律及有效防控具有重要意义。本研究采用人工气候箱梯度变温模拟自然环境养虫法开展相关研究，明确了甘蓝夜蛾卵、幼虫、蛹、成虫发育起点温度分别为日平均 7.98，6.54，9.36 和 10.78℃；有效积温依次为 87.00，607.36，351.51 和 108.52 d·℃(表 5)。该结果与罗进仓等(1993)以甜菜为寄主饲养甘蓝夜蛾各虫态的发育起点温度分别为 10.20，16.88，19.18 和 22.06℃，以及有效积温分别为 58.47，124.28，61.55 和 0.67 d·℃(成虫产卵前期)的研究结果存在很大差异。可以看出，除卵期的发育起点温度和有效积温与本研究结果相近外，其他各虫态的发育起点温度明显高于前者，有效积温则远远低于前者。笔者认为出现如此差异的主要原因是实验设计和方法问题，本研究采用 5 个不同日平均温度的多时段梯度自控变温处理，而后者是在同一无控室温条件下饲养试虫，且只有卵期有 3 组数据处理间温差大于 3℃，而其他虫态数据处理间平均温度相差仅 1℃左右，导致各处理间环境温度趋同于 21 ~ 22℃范围，可见，其实验结果的科学性有待商榷。另外，这种差异也可能与实验选择的寄主植物不同有关，武海卫等(2012)对美国白蛾 *Hyphantria cunea* 研究表明不同的食料植物对幼

虫和蛹的发育历期、存活率、蛹重、成虫寿命、产卵量等有显著影响;朱俊洪等(2005)对棉古毒蛾 *Orgyia postica* 的研究表明寄主植物对各虫态发育历期的影响主要在幼虫阶段,寄主植物进而影响其种群趋势指数;并且徐金汉等(1998)对多食性的昆虫如甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 进行单一寄主继代饲养,发现单一寄主饲养会引起种群质量下降。

昆虫对不同温度环境的适应性还体现在其种群数量的增加与减少,只有在更适宜的温度环境下昆虫生长发育更快,繁殖力更强,则种群数量呈迅速增长趋势。种群趋势指数 I 是利用生命表技术获得的反映特定昆虫种群世代间数量消长趋势的重要生态学指标。本研究结果显示,甘蓝夜蛾种群在日变温范围 16 ~ 28℃(日平均 22℃)的变温条件下,种群趋势指数最高,I 值为 117.81,是其他温度下种群趋势指数的 2.21 ~ 9.01 倍(表6),表明日平均 22℃更适合甘蓝夜蛾种群生存及繁殖,其种群数量将呈暴发性增长。在农业生产中,这种温度环境有可能导致该害虫的暴发性危害。

甘蓝夜蛾属间歇性暴发害虫,对其田间种群发生动态及危害程度的预测预警十分重要。本研究明确了甘蓝夜蛾各虫态及幼虫各龄期在不同变温处理条件下日平均温度与其发育速率的关系模型,更科学地给出了其各虫态发育起点温度和有效积温,以及种群趋势指数等生物学参数,可为推测甘蓝夜蛾发生世代及分布区域范围以及田间种群动态趋势等提供科学依据。

参考文献(References)

Cao ML, 2013. Effect of Temperature and Photoperiod on Development and Reproduction of *Athetis lepigone* (Möschler). MSc Thesis, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei. [曹美琳, 2013. 温度和光周期对二点委夜蛾实验种群生长发育及繁殖的影响. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文]

Chen JH, Cui J, Tang JW, Bi R, Zhang JP, Shi SS, 2018. Effects of temperature on the growth and development of *Riptortus pedestris* Fabricius. *Chin. J. Oil Crop Sci.*, 40(4): 579 – 584. [陈菊红, 崔娟, 唐佳威, 毕锐, 张金平, 史树森, 2018. 温度对点蜂缘蝽生长发育和繁殖的影响. 中国油料作物学报, 40(4): 579 – 584]

Dang ZH, Li YF, Pan WL, Li YY, Gao ZL, 2011. Developmental threshold temperature and effective accumulate temperature of *Athetis lepigone* Moschler. *J. Hebei Agric. Sci.*, 15(10): 4 – 6. [党志红, 李耀发, 潘文亮, 李妍妍, 高占林, 2011. 二点委夜蛾发育起点温度及有效积温的研究. 河北农业科学, 15(10): 4 – 6]

Deng WB, Tang XY, Hu DQ, Zhou YM, 2012. SPSS 19 (Chinese Version) Practical Tutorial on Statistical Analysis. Electronic Industry Press, Beijing. 131 – 133. [邓维斌, 唐兴艳, 胡大权, 周玉敏, 2012. SPSS 19(中文版)统计分析实用教程. 北京: 电子工业出版社. 131 – 133]

Dong QJ, Zhou JC, Zhu KH, Zhang ZT, Dong H, 2019. A simple method for identifying sexuality of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) pupae and adults. *Plant Prot.*, 45(5): 96 – 98, 105. [董前进, 周金成, 朱凯辉, 张柱亭, 董辉, 2019. 一种快速鉴别草地贪夜蛾蛹及成虫雌雄的简易方法. 植物保护, 45(5): 96 – 98, 105]

Fan ML, Fang SY, Chen L, Zhang CX, Shi PJ, 2017. Comparison of four non-linear models between temperature and intrinsic rate of increase of insects and mites. *J. Plant Prot.*, 44(4): 544 – 550. [凡美玲, 方水元, 陈磊, 张春霞, 时培建, 2017. 温度与昆虫内禀增长率关系模型的比较, 植物保护学报, 44(4): 544 – 550]

Feng KL, Liu Z, Li GF, Chen LS, Lin KJ, 2019. Morphological criteria for sexing different developmental stages of the codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Chin. J. Appl. Entomol.*, 56(2): 354 – 360. [冯丽凯, 刘政, 李国富, 陈刘生, 林克剑, 2019. 苹果蠹蛾不同虫态体征及雌雄个体的快速鉴别方法. 应用昆虫学报, 56(2): 354 – 360]

He J, Gao LY, Zhang R, Chen L, Zhu MM, 2014. Effects of temperature on the growth, development and reproduction of *Jakowleffia setulosa* (Hemiptera: Lygaeidae). *Acta Entomol. Sin.*, 57(8): 935 – 942. [何嘉, 高立原, 张蓉, 陈林, 朱猛蒙, 2014. 温度对巨膜长蝽生长发育与繁殖的影响. 昆虫学报, 57(8): 935 – 942]

Ju RT, Wang F, Li YT, Du YZ, Chi XZ, 2007. Effects of temperature on the development and survival of experimental population of *Parasa consocia*. *J. Plant Prot.*, 34(5): 466 – 470. [鞠瑞亭, 王凤, 李跃忠, 杜予州, 池杏珍, 2007. 温度对褐边绿刺蛾实验种群生长发育及存活的影响. 植物保护学报, 34(5): 466 – 470]

Li DM, Wang MM, 1986. Research on rapid estimation of developmental starting point and effective accumulated temperature method. *Entomol. Knowl.*, 24(4): 184 – 187. [李典谟, 王莽莽, 1986. 快速估计发育起点及有效积温法的研究. 昆虫知识, 24(4): 184 – 187]

Li XC, Cui J, Xu W, Gao Y, Shi SS, 2018. Effects of temperature on growth and development of *Lamprosema indicata* Fabricius (Lepidoptera: Pyralidae). *Soybean Sci.*, 37(4): 590 – 595. [李新畅, 崔娟, 徐伟, 高宇, 史树森, 2018. 温度对豆卷叶螟 *Lamprosema indicata* (Fabricius)生长发育的影响. 大豆科学, 37(4): 590 – 595]

Liu SS, Meng XD, 1989. The change pattern of development rates under constant and variable temperatures in *Myzus persicae* and *Lipaphis erysimi*. *Acta Ecol. Sin.*, 9(2): 182 – 190. [刘树生, 孟学多, 1989. 桃蚜、萝卜蚜发育速率在恒温和变温下的变化规律研究. 生态学报, 9(2): 182 – 190]

Liu YH, Yan XF, Wen DM, Lu PF, Zong SX, Luo YQ, 2016. Effects of temperature on the growth, development and reproduction of *Trabala vishnou gigantina* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Acta*

Entomol. Sin., 59(3): 309 - 315. [刘永华, 阎雄飞, 温冬梅, 陆鹏飞, 宗世祥, 骆有庆, 2016. 温度对栎黄枯叶蛾生长发育及繁殖的影响. 昆虫学报, 59(3): 309 - 315]

Luo JC, Wang CZ, Duo XY, 1993. Study on the starting point temperature and effective accumulated temperature constant of *Mamestra brassica*. *Entomol. Knowl.*, 30(2): 89 - 91. [罗进仓, 王长政, 朵向阳, 1993. 甘蓝夜蛾发育起点温度和有效积温常数的研究. 昆虫知识, 30(2): 89 - 91]

Luo ZX, Ren LL, Qi LY, Zhou SD, Dai HG, 2009. Effects of temperature on the development of *Bactrocera dorsalis*. *Chin. J. Ecol.*, 28(5): 921 - 924. [罗智心, 任荔荔, 祁力言, 周曙东, 戴华国, 2009. 温度对桔小实蝇种群发育的影响. 生态学杂志, 28(5): 921 - 924]

Morris RF, 1963. Predictive population equations based on key factors. *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 195(S32): 16 - 21.

Pan F, He YR, Wang DS, Guo XL, Chen MC, 2012. Research advances on effect of temperature on growth, development and reproduction of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L). *J. Environ. Entomol.*, 34(1): 104 - 109. [潘飞, 何余容, 王德森, 郭祥令, 陈绵才, 2012. 温度对小菜蛾生长发育和繁殖影响的研究进展. 环境昆虫学报, 34(1): 104 - 109]

Shang XL, Yang MF, Zhang CR, Cai L, Feng YL, Qiu T, 2013. Effects of temperature on the growth and development of *Pyralis farinalis* (Lepidoptera: Pyralidae), one insect used for producing insect tea in China. *Acta Entomol. Sin.*, 56(6): 671 - 679. [尚小丽, 杨茂发, 张昌容, 蔡兰, 冯友丽, 邱婷, 2013. 温度对产虫茶昆虫紫斑谷螟生长发育的影响. 昆虫学报, 56(6): 671 - 679]

Shi PJ, Ikemoto T, Ge F, 2011. Development and application of models for describing the effects of temperature on insects' growth and development. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 48(5): 1149 - 1160. [时培建, 池本孝哉, 戈峰, 2011. 温度与昆虫生长发育关系模型的发展与应用. 应用昆虫学报, 48(5): 1149 - 1160]

Shi SS, Cui J, Qi LZ, Wu TT, Xu XM, 2013. Effects of temperature on feeding amount and hunger tolerance of *Colposcelis signata* (Motschulsky) adult. *J. Jilin Agric. Univ.*, 35(4): 406 - 410. [史树森, 崔娟, 齐灵子, 武婷婷, 许晓明, 2013. 温度对斑鞘豆叶甲成虫取食量和耐饥力的影响. 吉林农业大学学报, 35(4): 406 - 410]

Shi SS, Cui J, Wu TT, Zhang M, Li WY, Song PX, 2014. Study on soybean harming feeding law of *Mamestra brassicae* L. larva and its growth and development. *J. Jilin Agric. Univ.*, 36(3): 271 - 275. [史树森, 崔娟, 武婷婷, 张萌, 李维宇, 宋鹏翔, 2014. 甘蓝夜蛾幼虫为害大豆取食规律及其生长发育的研究. 吉林农业大学学报, 36(3): 271 - 275]

Shi SS, Cui J, Xu W, Wu TT, Song PX, Li WY, 2015. Effects of temperature on growth and development of *Sitochroa verticalis* eggs and larvae. *Soybean Sci.*, 34(1): 108 - 111. [史树森, 崔娟, 徐伟, 武婷婷, 宋鹏翔, 李维宇, 2015. 温度对尖锥额野螟卵和幼虫生长发育的影响. 大豆科学, 34(1): 108 - 111]

Wang J, Li BL, Wu JX, Xu XL, 2016. Effects of fluctuating temperature on the reproduction and metabolism of primary energy substances in *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomol. Sin.*, 59(9): 917 - 924. [王娟, 李伯辽, 仵均祥, 许向利, 2016. 变温对粘虫生殖及主要能源物质代谢的影响. 昆虫学报, 59(9): 917 - 924]

Wang M, Wang XQ, 2015. Influences of temperature on the development and life table parameters of a laboratory population of *Celypha flavipalpana* Herrich-Schaffer (Lepidoptera: Tortricidae). *Chin. J. Appl. Entomol.*, 52(3): 671 - 678. [王淼, 王小奇, 2015. 温度对草小卷蛾发育的影响及其实验种群生命表. 应用昆虫学报, 52(3): 671 - 678].

Watt KEF, 1963. Mathematical population models for five agricultural crop pests. *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 95(S32): 83 - 91.

Wu HW, Kang Z, Xin SL, Qin XB, Zhang QM, Liu HX, 2012. Effects of different food plants on the growth, development and reproduction of fall webworm, *Hyphantria cunea*, larvae. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 49(1): 963 - 968. [武海卫, 康智, 信善林, 秦绪兵, 张秋梅, 刘焕秀, 2012. 不同食料植物对美国白蛾生长发育和繁殖的影响. 应用昆虫学报, 49(1): 963 - 968]

Wu KJ, Gong PY, Ruan YM, 2009. Estimating developmental rates of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) pupae at constant and alternating temperatures by nonlinear models. *Acta Entomol. Sin.*, 52(6): 640 - 650. [吴坤君, 龚佩瑜, 阮永明, 2009. 用非线性模型估测恒温和变温下棉铃虫蛹的发育率. 昆虫学报, 52(6): 640 - 650]

Wu XJ, Liu SS, Zheng ZL, 1994. The influence of variable temperature upon rate of development in two insects. *Entomol. Knowl.*, 31(4): 237 - 240. [吴晓晶, 刘树生, 郑中良, 1994. 变温对两种昆虫发育速率的影响. 昆虫知识, 31(4): 37 - 240]

Xu JH, Guan X, Huang ZP, 1998. Study on artificial diets for beet armyworm. *Acta Phytophyl. Sin.*, 25(2): 133 - 136. [徐金汉, 关雄, 黄志鹏, 1998. 甜菜夜蛾人工饲料研究. 植物保护学报, 25(2): 133 - 136]

Yu HC, Deng JJ, Wang YW, Zhang XL, Song LT, 2013. Effect of temperature and photoperiod on diapause induction in Harbin population of *Mamestra brassicae*. *J. Northeast Agric. Univ.*, 44(1): 133 - 136. [于洪春, 邓佳佳, 王雨薇, 张鑫琳, 宋龙腾, 2013. 温度与光周期对甘蓝夜蛾哈尔滨种群滞育诱导的影响. 东北农业大学学报, 44(1): 133 - 136]

Zhu JH, Zhu W, Zhang FP, 2005. Effects of different food plants on development and reproduction of *Orgyia postica* (Lepidoptera: Lymantriidae). *Entomol. J. East China*, 14(1): 9 - 13. [朱俊洪, 朱稳, 张方平, 2005. 不同食料植物对棉古毒蛾生长发育和繁殖的影响. 华东昆虫学报, 14(1): 9 - 13]

(责任编辑: 赵利辉)